

그림자 영향을 고려한 PV 시스템의 VPO MPPT 제어

崔正植*, 高在涉**, 鄭東和†

Development of VPO MPPT of PV System Considering Shadow Influence

Jung-Sik Choi, Jae-Sub Ko, and Dong-Hwa Chung

요 약

본 논문은 그림자 영향을 고려한 PV(Photovoltaic) 시스템의 VPO(Variable Perturbation & Observation) MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어를 제시한다. 태양전지의 출력 특성은 비선형이고 온도, 일사량 및 그림자의 영향을 많이 받는다. MPPT 제어는 태양광발전 시스템의 출력 및 효율을 증가시키기 위한 매우 중요한 기술이다. 종래의 PO(Perturbation & Observation)와 IC(Incremental conductance) 등은 지속적인 자려진동에 의해 MPP(Maximum Power Point)를 찾는 방법으로 그림자 영향에 의해 출력이 급격하게 변할 경우 MPPT 제어를 수행하지 못한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 출력 변동에 따라 스텝 값이 변하는 새로운 제어 알고리즘을 제시한다. 제시한 알고리즘은 일사량, 온도 및 그림자 영향에 대해 종래의 제어 알고리즘과 응답특성을 비교하고 이를 통해 제시한 알고리즘의 타당성을 입증한다.

ABSTRACT

This paper presents the variable perturbation and observation(VPO) maximum power point tracking(MPPT) control of the photovoltaic(PV) system considering the shadow influence. The output characteristics of the solar cell is a nonlinear and affected by a temperature, the solar radiation and influence of a shadow. MPPT control is a very important technique in order to increase an output and efficiency of the solar power generation. Conventional perturbation and observation(PO) and incremental conductance(IC) are the method finding MPP by the continued self-excitation vibration. The MPPT control is unable to be performed by rapid output change affected by the shadow. To solve this problem, this paper proposes the VPO MPPT algorithm which changes step size according to output variation. The response characteristics of VPO MPPT algorithm proposed in this paper compares with response characteristics of conventional MPPT algorithm about the radiation, temperature and shadow influence. The validity of the algorithm proposed in this paper prove through the results of the comparisons.

Key Words : Photovoltaic, MPPT Algorithm, Shadow Influence, Perturbation & Observation

1. 서 론

태양광발전 시스템은 다른 신·재생 에너지에 비해 운전 및 유지관리 비용을 최소화할 수 있는 장점이 있

다. 따라서 태양광발전 시스템은 오래 전부터 많은 연구가 진행되어 왔고, 전력전자 기술의 발전에 의한 인버터의 기능 향상과 대형화로 여러 분야에서 태양광발전 시스템이 사용되고 있다. 그러나 태양광발전 시스템의 주요 부품인 태양전지의 제작비용이 감소되었지만, 종래의 발전 방법과 비교했을 때 초기 설치비용이 높고 에너지 밀도 및 효율이 낮아서 발전단가는 높게 평가되고 있다.^{[1][2]} 태양광발전 시스템의 출력 효율을 높이기 위하여 일반적으로 태양전지 셀 자체의 효율을 높이거나 태양광발전 제어용 전력변환 시스템의 변환

†교신저자 : 정희원, 순천대 전기제어공학과 정교수

E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr

*정희원, 전자부품연구원 선임연구원

**정희원, 순천대 대학원 전기공학과 박사과정

접수일자 : 2011. 8. 12

1차 심사 : 2011. 8. 31

심사완료 : 2011. 9. 22

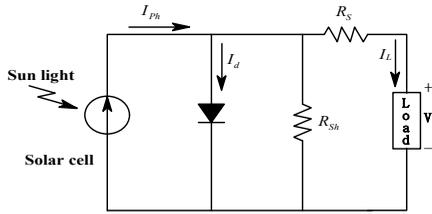


그림 1 태양전지의 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of solar cell

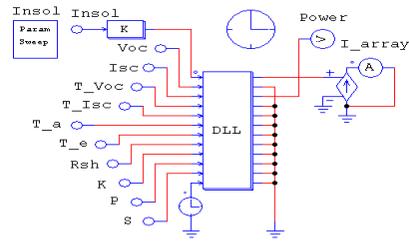


그림 2 태양전지 어레이의 PSIM 모델
Fig. 2 PSIM model of solar cell array

효율 및 MPPT 제어를 하여 높이는 방법, 태양이 항상 법선을 이루면서 태양전지 모듈에 입사되게 하는 추적식 방법 등을 이용하고 있다.^{[3][4]}

이 중, 태양광 PCS 제어를 통한 태양광발전 제어용 전력변환 시스템의 효율을 높이는 방법이 전력전자 분야에서 응용이 가능하다. 전력변환 시스템의 제어알고리즘에 있어서 발전설비의 효율을 높이기 위해 일반적으로 가장 용이한 방법은 MPPT 제어이며 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있고 이를 응용한 제어기들도 태양광발전 전력변환 장치에 필수적으로 사용되고 있다.

종래의 MPPT 제어 방법은 정전압 제어방식과 비 선형함수 계산방식, PO 제어방법, IC 제어방법 등이 대표적이다.[5-12] 종래의 MPPT 제어방식들은 거의 대부분 태양전지에 그림자 효과가 발생한 경우에 대해서는 고려하지 않았다. 이는 태양전지 셀을 직·병렬로 구성한 PV 모듈의 경우, 부분적인 그림자에 의해 다수의 국부적인 최대전력점이 존재하는 경우에는 최대전력점 추종을 실패할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 그림자 영향을 고려한 새로운 MPPT 제어 방법을 제시한다. 새로운 MPPT 제어 방법은 종래의 PO 방법을 개선한 것으로서 진동 스텝 크기를 출력오차에 따라 다양하게 변화하여 태양광 발전 출력변화에 강인하게 제어가 되며 구조가 간단하여 구현이 용이하다. 제시한 제어 알고리즘은 종래의 PO 및 IC 방법과 응답특성을 비교하여 그 타당성을 입증한다.

2. 태양전지 모델링

빛이 조사될 때 광기전력 효과를 이용한 태양전지의 등가회로를 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

여기서, I_{ph} 는 광전류, I_d 는 다이오드 포화전류이다.

태양전지의 등가회로부터 단락전류 I_{sc} 는 이상적으로 광전류 I_{ph} 와 일치하고, 다이오드 포화전류 I_d 에 의해서 결정되는 태양전지의 개방전압은 다음 식과 같다.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_d} + 1 \right] \quad (1)$$

여기서, V_{oc} 는 개방전압, k 는 볼츠만 상수, q 는 전하[C], T 는 태양전지 동작온도[K]를 나타낸다. 또한, 온도변화에 따른 단락전류와 개방전압의 관계식은 다음과 같다.

$$I_{sc} = I_o \left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{kT} \right) \right] \quad (2)$$

태양전지의 전류-전압 특성곡선을 얻기 위한 수식은 다음과 같이 표현된다.

$$I_{ph} = I_{sc} S_N + I_i (T_c - T_r) \quad (3)$$

$$I_d = I_o \left[\exp \left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$I_o = I_{or} \left[\frac{T_c}{T_r} \right]^3 \cdot \exp \left(\frac{qE_g}{Bk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (5)$$

$$I_L = I_{ph} - I_d - \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

여기서, S_N : 단위 일사량, B : 제조상수

I_i : 표면온도 1°C 상승 시 단락 전류 온도계수[A/K]

T_c : 태양전지 온도[K], T_r : 태양전지 동작 기준온도[K]

I_{or} : 태양전지 동작 기준온도에서 역포화전류[A]

E_g : 에너지 밴드 갭 (Si PN 접합 에너지 Gap, 1.12[eV])

식 (3)~(6)를 이용하면 태양전지 어레이의 출력특성을 얻을 수 있으며, 그림 2는 3.2[kW]급 태양전지 어레이의 PSIM 모델과 DLL(Dynamic Link Library)을 이용하여 일사량과 온도의 영향을 고려한 PSIM 회로도이다.

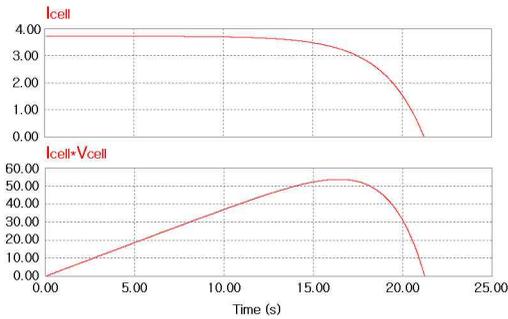


그림 3 태양전지 어레이의 I-V, P-V 특성곡선
Fig. 3 I-V, P-V characteristic waveform of solar cell array

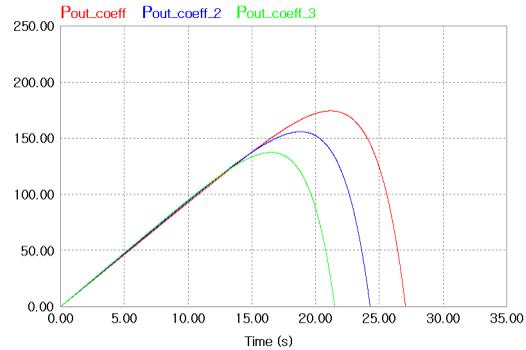


그림 5 온도에 대한 태양전지의 출력특성
Fig. 5 Output characteristics of solar cell by temperature

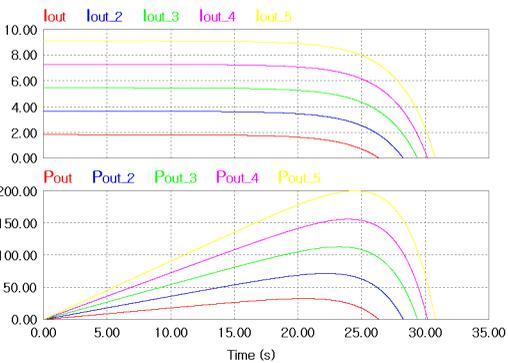


그림 4 일사량에 대한 태양전지의 출력특성
Fig. 4 Output characteristics of solar cell by radiation

그림 3은 태양전지 어레이의 시뮬레이션 결과 파형이다. 태양전지로부터 최대전력을 얻기 위해서는 동작전압 또는 전류를 신중히 제어할 필요가 있다.

태양전지의 특성곡선은 셀의 온도와 일사량 등 여러 가지 환경적인 요소에 크게 영향을 받는다. 이는 일사량과 태양전지 단락전류와의 관계에 기인하게 되며 태양전지의 모델링으로 나타 낼 수 있다. 또한 온도가 상승할수록 개방전압이 하강하여 P-V 곡선이 온도상승에 따라 왼쪽으로 이동한다. 그림 4는 일사량을 200[W/m²]에서 1000[W/m²] 까지 200[W/m²]씩 증가시켰을 때 일사량에 따른 태양전지의 출력특성을 나타내고 있다. 일사량 변동에 태양전지의 최대전류와 전력은 일사량에 비례하여 변화되지만 전압은 일사량이 60~100[%]의 범위에서는 큰 변화가 없으나, 낮은 일사량인 30[%]미만에서는 크게 감소되는 것을 알 수 있다.

그림 5는 온도에 따른 태양전지의 출력특성으로 온도를 25[°C]에서 75[°C]까지 25[°C]씩 증가하였을 때의 변화를 나타내고 있다. 개방전압 V_{oc} 는 20~100[°C]사

이에서 2[mV/°C]씩 감소하고, 광전류는 온도가 상승함에 0.1[%/°C]씩 증가하고, 최대전력은 0.35[%/°C]씩 감소되며, 최대효율은 지수 함수적으로 감소한다. 그림에서는 셀 표면의 온도가 증가할 때 출력이 크게 변화되고 있음을 알 수 있다. 즉 태양전지의 출력은 온도와 일사량에 의해서 영향을 받으며 특성분석을 위해서는 온도와 일사량을 반드시 고려하여야 한다.

3. 종래의 MPPT 제어 알고리즘

MPPT의 제어방법은 하드웨어적인 분류방식으로 아날로그방식과 디지털방식이 있으며, 알고리즘 측면에서는 PO, IC 및 CV 제어방법 등이 있다. 또한 새로운 방식의 MPPT 제어방법에 대해 현재까지 많은 연구 성과가 보고되고 있다. MPPT 제어방법은 일사량과 표면온도의 변화에 영향을 받는 태양전지의 MPP를 추종하여 V_{ref} 값으로 출력된다.

MPP는 동일 일사량에서 발생하는 전력이 출력전압에 따라 변하기 때문에 MPPT 제어를 하지 않을 경우 태양전지는 MPP에서 발전하지 못하여 태양전지의 발전효율이 저하되고 손실이 발생된다. 따라서 일사량 조건과 부하조건의 변화에 따라 최적의 동작전압을 추종하는 MPPT 제어가 필요하다.

3.1 PO 제어방법

PO MPPT 제어방법은 간단한 피드백 구조를 갖으며 소수의 측정 파라미터를 갖기 때문에 널리 사용된다. 이는 태양전지전압을 주기적으로 증가, 감소시킴으로써 동작하며, 이전의 교란주기 동안의 태양전지 어레이 출력전력과 함께 현재 어레이의 출력전력을 비교

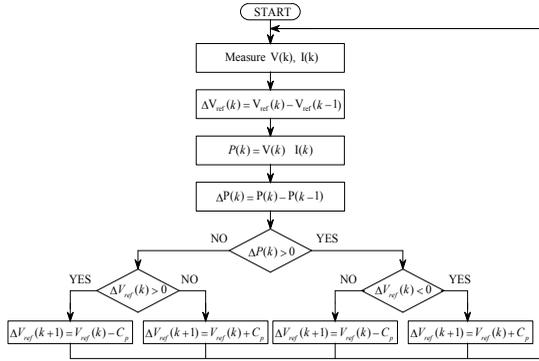


그림 6 PO MPPT 방법의 순서도
Fig. 6 Flowchart of PO MPPT Method

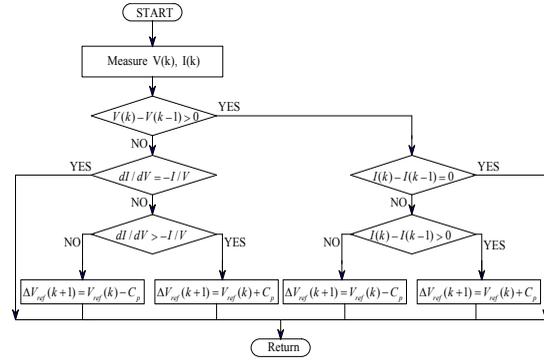


그림 7 IC MPPT 방법의 순서도
Fig. 7 Flowchart of IC MPPT Method

하여 MPP를 연속적으로 추적하며 찾는다. 이 방법은 그림 6과 같은 순서도에 의해 동작한다.

그림 6의 제어방법은 다음과 같이 설명할 수 있다. 전력이 증가하면 교란은 다음 주기 동안 계속해서 같은 방향으로 증가할 것이며 그렇지 않으면 교란의 방향은 반대가 될 것이다. 이것은 어레이 단자전압이 모든 MPPT 주기 동안 교란된다는 것을 의미한다. 그러므로 MPP에 이르렀을 때 PO 제어방법은 급변하는 환경조건에서 자려진동 할 것이며, 그 결과 태양전지 어레이에서 손실이 발생하게 된다. 이 문제는 MPP에 도달했을 때를 검출하기 위해 바로 앞의 주기 동안 두 개의 파라미터 비교와 교란부를 바이패스하기 위한 PO 제어방법의 개선으로 해결할 수 있다. 전력손실을 줄이기 위한 다른 방법으로는 교란 스텝의 감소가 있다. 그러나 이 방법은 환경조건이 급하게 변할 경우 MPP 추적속도가 늦어지게 되므로 스텝의 결정이 중요하게 된다. 여기서 C_p 값을 0.1[V]로 설정하여 각각의 MPPT 제어방법을 시뮬레이션 하였다.

3.2 IC 제어방법

IC MPPT 제어방법은 임피던스 비교법, 증분 컨덕턴스방법으로 불린다. 이 방법은 태양광 전지 어레이 출력의 컨덕턴스와 증분 컨덕턴스를 비교하여 MPP를 추종하는 방법이다. 그리고 PO 제어방법에서 간과하고 있는 일정온도에서 일사량이 증가할 경우, 전압의 변동 폭이 '0'이 되도록 제어 알고리즘이 추가되어 있으므로 좀 더 향상된 방법이라고 할 수 있다. 특히 빠르게 변하는 일사량에서 효과적인 방법이며 MPP에 도달할 경우 태양광 전지 어레이의 출력전력이 안정한 특징이 있다. PO 제어방법의 문제점을 개선하기 위한 IC 제어방법은 전압과 전류를 측정하여 전력 대 전압

의 기울기를 계산한 후 기울기의 부호 즉, 양과 음을 판단하여 기준전압을 증가 혹은 감소시켜 MPP를 추종하는 방법이다. 많은 문헌을 통하여 IC 제어방법이 PO 제어방법보다 향상된 알고리즘임을 실험으로 증명하였으며 특히 빠른 일사량 변동할 경우에 유리한 제어방법으로 알려져 있다. 이 방법은 그림 7과 같은 순서도에 의해 동작한다.

MPP는 $\frac{dP}{dV} = 0$ 이 되는 경우이므로 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$IdV + VdI = 0 \tag{7}$$

$$\frac{V}{I} = -\frac{dV}{dI} \tag{8}$$

위 식은 부하 임피던스가 MPP에 있어서 태양전지 어레이의 V-I곡선의 기울기에 동등하다는 것을 나타내고 있다.

MPP의 최대전력곡선에서 MPP의 왼쪽은 전력의 증가(즉, $dP/dV > 0$)이며, MPP의 오른쪽은 전력의 감소(즉, $dP/dV < 0$)를 나타낸다.

태양전지의 전류와 전압으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{dIV}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \tag{9}$$

MPP 조건 $V = V_{mp}$ 를 만족하는 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \tag{10}$$

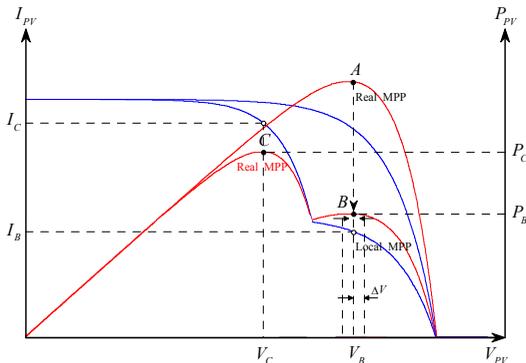


그림 8 부분적인 그림자 발생 시 P0, IC MPPT의 추종 특성
Fig. 8 Tracking characteristics of P0 and IC with partial shadow

IC 제어방법은 빠른 환경변화에서 MPPT 성능이 매우 좋은 장점이 있으나, 많은 계산량으로 인해 고성능 CPU가 필요하므로 결국 시스템 단가를 상승시키는 단점이 있다.

4. 제시한 MPPT 제어 알고리즘

종래의 MPPT 제어방식들은 거의 대부분 태양전지에 그림자 효과가 발생한 경우에 대해서는 고려하지 않았다. 이는 태양전지 셀을 직·병렬로 구성한 PV 모듈의 경우, 부분적인 그림자에 의해 다수의 국부적인 최대전력점이 존재하는 경우에는 최대전력점 추종을 실패할 수 있다는 것을 의미한다. 종래의 MPPT 방법 중 가장 많이 쓰이고 있는 PO 방법과 IC 방법에 대한 PV 모듈에 부분적인 그림자가 발생한 경우의 MPPT 추종 특성은 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

그림 8에서 부분적인 그림자 영향이 발생하지 않은 경우, MPPT가 정상적으로 추종되고 있다면, 동작점은 A점에 위치하게 된다. 이 때 PV 모듈에 부분적인 그림자가 발생하여 일부 태양전지 셀의 바이패스 다이오드가 도통된 상태가 된다면 PV 모듈의 출력곡선은 변화하게 되고, 동작점은 B점으로 이동하게 된다. 부분적인 그림자 영향에 의해 바이패스 다이오드가 도통 상태가 된 경우에는 $P-V$ 특성 곡선에서 여러 개의 국부적 최대전력점이 발생하며, 그림 8에서 B점은 국부 최대전력점이고 C점이 실제 최대전력점이 된다.

종래의 PO 및 IC 계열의 MPPT 방식에서는 A점에서 B점으로 동작점이 이동하는 경우, 일사량이 급변 또는 그림자 영향이 발생했다고 판단하고, B점에서부터 ΔV 만큼 전압 기준치를 변동시키면서 MPP를 판별한다. 이 경우 그림 8에서와 같이 B점을 기준으로

$V_B + \Delta V$, $V_B - \Delta V$ 의 전압범위에 있는 지점의 전력은 B점의 전력보다 낮기 때문에 B점을 MPP라고 판단하고 B점 부근에서 자려 진동을 하게 된다. 따라서 PV 시스템에서는 이러한 부분적인 그림자 영향에 의한 MPPT 제어의 실패가 발생한다. 또한 현재 상용되고 있는 제품을 부분적인 그림자 영향이 존재하는 조건에서 테스트하여 부분적인 그림자 영향에 의해 발생하는 전력손실이 70[%]에 달한다는 것을 확인한 연구가 발표되었다.[9] 발전 시간에 제약을 갖는 태양광발전 시스템의 특성상 부분음영에 의한 영향을 고려하여 MPPT를 수행함으로써 태양광발전 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 전류제어형 MPPT 제어를 제시하고 출력 전력에 따라서 PO 알고리즘의 스텝 값을 변화시키는 VPO 방법의 알고리즘을 제시한다.

VPO MPPT 알고리즘은 종래의 PO 방법을 개선한 알고리즘으로서 환경조건에 따라 스텝 크기를 변화시키는 방법을 나타낸다. 제시한 VPO MPPT 알고리즘의 과정은 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 현재 전력과 이전 전력을 비교하여 변화량을 통해 3가지의 가속 계수 중 하나를 선택할 수 있다. 그 다음은 종래의 PO 방법과 마찬가지로 이전의 진동이 최대전력점으로 향하는지 또는 멀어지는지를 판별하고, 현재 동작전압이 최적전압보다 높은지 또는 낮은지를 판별하여 4가지의 동작모드로 운전한다.

이러한 4가지의 동작 모드는 스텝 크기를 결정하는데 서로 다른 이득 계수를 갖으며, 이는 이전의 진동 스텝의 크기에 의존한다. 각 반복 루프에서 새로운 지령전류 I_{ref} 는 진동의 스텝 크기 ΔI 에 이전의 지령전류를 더하며 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{ref}(k) = I_{ref}(k-1) + \alpha \Delta I \quad (11)$$

여기서 가속 계수 α 는 그림자 영향 또는 일사량 변화 등의 환경변화에 민감하게 동작하도록 제어된다.

그림자의 영향은 $P_{pv_diff} > \epsilon$ 을 통해 설정된 오차보다 전력의 변화가 작을 경우에는 그림자가 발생하지 않은 일반적인 경우로서 $\alpha = 1$ 을 사용한다. 또한 설정된 오차보다 전력의 변화가 클 경우에는 그림자가 발생한 경우로 판단하여 제어가 수행된다. 그림자가 발생하였을 경우에는 현재전력(P_{pv})과 그림자가 발생하지 않았을 때의 최대전력(P_{MPP})의 1/2 값과 비교를 한다. $P_{pv} > P_{MPP} / 2$ 일 경우 식 (12)에 의해 $1 < \Delta I \leq 2$ 을

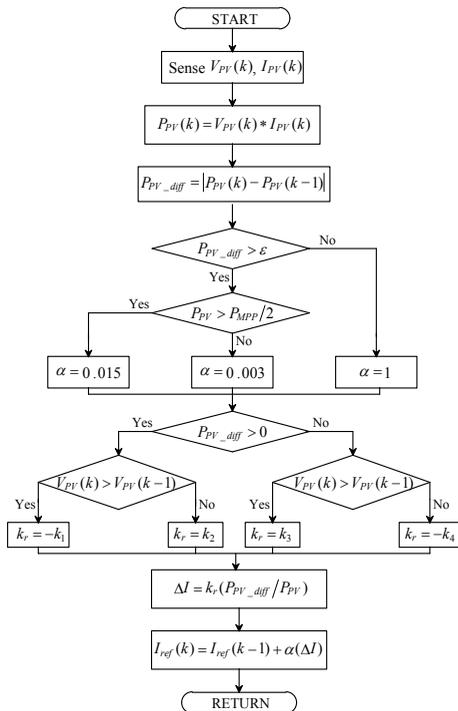


그림 9 제시한 MPPT 알고리즘의 순서도
Fig. 9 Flowchart of proposed MPPT algorithm

가지게 되고, $P_{pv} < P_{MPP}/2$ 일 경우에는 $2 < \Delta I$ 을 가진다. 그림자가 발생할 경우에는 일반적인 제어에 비하여 ΔI 값이 매우 큰 값을 가지기 때문에 그림 8에서 국부적인 최대전력점인 B점을 벗어나게 되어 실제 최대전력점인 C점에서 동작을 하게된다. 그러나 ΔI 값이 너무 클 경우 제어의 범위를 벗어날 문제가 있기 때문에 ΔI 의 적절한 범위를 위해 α 값을 0.015와 0.003으로 제어한다.

또한 최적전압과 최적전류의 변화 폭이 클 경우에 최대전력점으로 빠르게 추종할 수 있도록 하며, 실제 최대전력점에서 MPPT 제어가 정확하게 변환되도록 수행한다. 진동 스텝의 크기는 현재 전력과 이전 전력의 민감도에 의존한다.

진동 스텝의 신호는 $P-V$ 특성곡선에서 기울기 신호에 대한 방향을 나타내는 k_r 에 의해 결정되며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta I = k_r \frac{P_{pv_diff}}{P_{pv}} \quad (12)$$

$$P_{pv_diff} = P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1) \quad (13)$$

여기서 $P_{pv}(k)$ 는 k 번째 샘플링 기간 동안의 PV 전

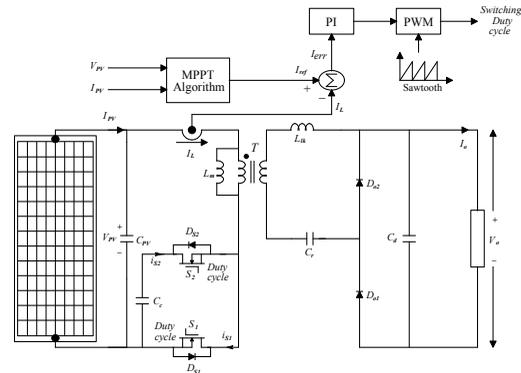


그림 10 MPPT 제어를 위한 DC-DC 컨버터의 구성도
Fig. 10 Configuration of DC-DC converter for MPPT control

력을 나타내고, $P_{pv}(k-1)$ 는 $k-1$ 번째의 샘플링 기간 동안 측정된 PV 전력을 나타낸다. 또한 k_r 은 진동 방향과 dP_{pv}/dV_{pv} 의 기울기 방향으로 혼합된 4가지 동작모드에 대한 계수를 나타낸다. 진동 사이클은 PV 전력이 최대전력점에서 유지될 수 있도록 환경 조건의 변화에 대해 반복되어 수행한다.

MPPT 변환은 최대전력점을 추종하기 위해 DC-DC 승압형 컨버터에서 수행된다. 전류제어형 MPPT 제어를 수행하기 위한 승압형 컨버터의 구조는 그림 10과 같이 나타낼 수 있다. 제시한 DC-DC 컨버터 제어 알고리즘은 입력과 출력을 포함하고 있으며, 개선된 PO 제어 알고리즘을 통한 출력은 최적전류인 지령전류 I_{ref} 를 출력한다. 출력된 I_{ref} 는 DC-DC 컨버터의 인덕터 전류 I_L 과 비교하여 PI 제어기로 입력된다. PI 제어기의 출력은 톱니파와 비교하여 PWM을 형성하고 이러한 신호는 Duty cycle로 DC-DC 컨버터의 스위칭 동작을 수행하여 최종적인 MPPT 제어로 동작한다.

5. 시스템 성능결과

5.1 시뮬레이션결과 분석

MPPT 제어를 수행하는 각각의 알고리즘에 대한 성능분석을 위한 PSIM 회로도는 그림 11과 같다. 표 1은 MPPT 제어의 성능분석을 위한 태양전지 모듈의 파라미터를 나타낸다. 태양전지 모듈의 파라미터는 온도 $25[^\circ C]$ 및 일사량 $1000[W/m^2]$ 의 실험조건에서 측정된 값을 나타낸다. PSIM 회로도는 본 논문에서 제시한 높은 전압 이득을 갖는 승압형 DC-DC 컨버터와 단상 인버터로 구성되었다. 또한 제어부는 태양전지의 모델링을 위한 PVMODEL.dll과 DC link 전압 제어를

표 1 태양전지 모듈의 파라미터
Table 1 Parameter of solar cell module

파라미터	기호	측정값	단위
개방전압	V_{oc}	42.8	$[V_{dc}]$
단락전류	I_{sc}	8.42	$[A]$
최대전력 전압	V_{mp}	34.6	$[V_{dc}]$
최대전력 전류	I_{mp}	6.5	$[A]$
최대전력	P_{mp}	225	$[W]$

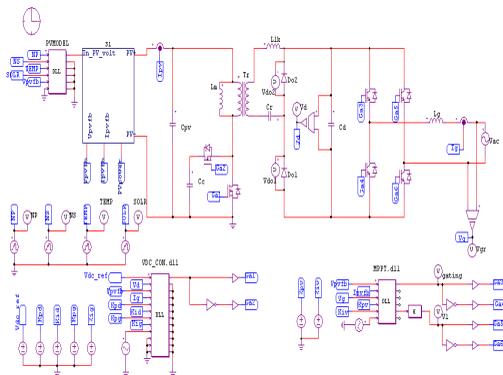
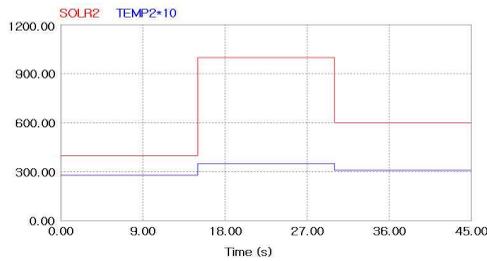
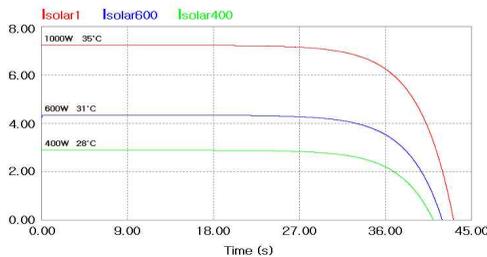


그림 11 MPPT 제어를 위한 PSIM 회로도
Fig. 11 PSIM circuit for MPPT control



(a) Changed radiation and temperature



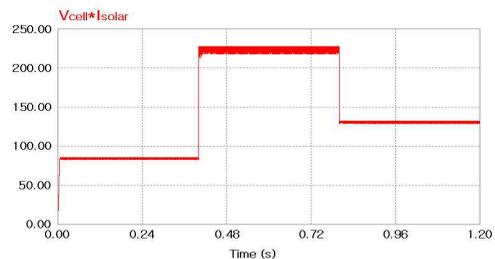
(b) $P-V$ characteristic curve of solar cell module

그림 12 일사량 및 온도가 변동할 경우의 태양전지 모듈의 특성곡선
Fig. 12 Characteristic curve of solar cell module with changed radiation and temperature

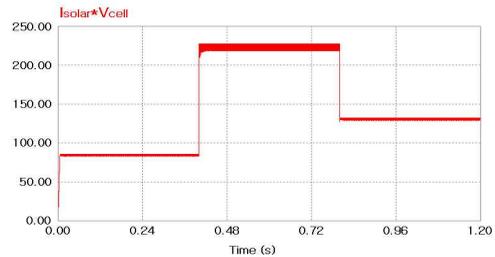
위한 VDCCON.dll 및 MPPT 제어 알고리즘의 적용을 위한 MPPT.dll로 구성하였다. MPPT 제어의 성능시험은 일사량과 온도가 변동할 경우 및 그림자 영향의 조건으로 나누어 분석하였다.

그림 12는 일사량이 $400[W/m^2] \rightarrow 1000[W/m^2] \rightarrow 600[W/m^2]$ 으로 변동함에 따라 온도가 $28[^\circ C] \rightarrow 35[^\circ C] \rightarrow 31[^\circ C]$ 로 변화할 경우를 나타낸다. 그림 12(a)는 일사량 및 온도의 변화, 그림 12(b)는 태양전지의 출력전력을 나타내고 있다.

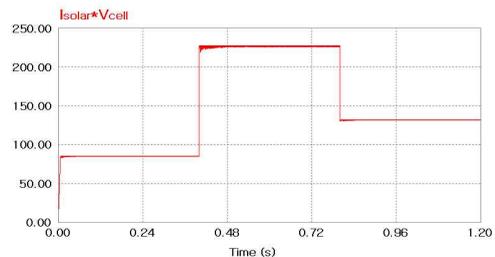
그림 13은 MPPT 제어방법에 따른 태양전지 모듈의 출력전력 비교를 나타낸다. 그림 13(a)는 PO, 13(b)는 IC, 13(c)는 본 논문에서 제시한 VPO MPPT 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 응답특성을 나타낸다. 일사량 및 온도 변화에 대한 PO 제어방법의 최대전력 오차율은 약 3.9%, IC 제어방법은 3.6%, 본 논문에서 제시한 VPO 제어방법은 1% 이내로 나타나고 있다.



(a) PO MPPT Method

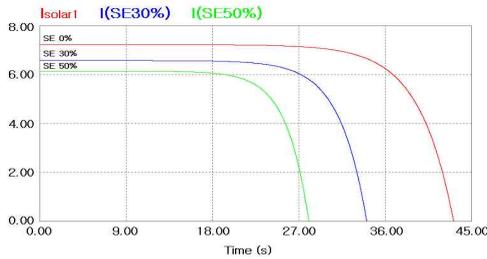


(b) IC MPPT Method

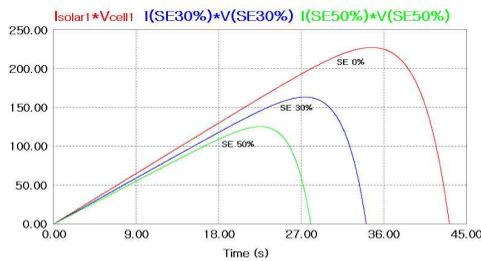


(c) VPO MPPT Method

그림 13 태양전지 모듈의 출력 응답특성(일사량/온도 변화)
Fig. 13 Response output characteristic of cell module(changing of radiation/temperature)



(a) $I-V$ characteristic curve of solar cell considering shaded effect

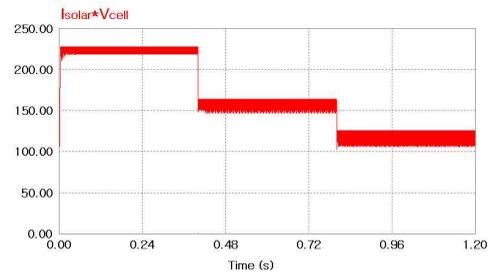


(b) $P-V$ characteristic curve of solar cell considering shaded effect

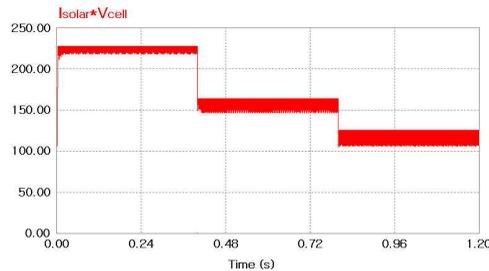
그림 14 그림자 영향을 고려한 태양전지 모듈의 특성곡선
Fig. 14 Characteristic curve of solar cell module considering shaded effect

그림 14는 그림자 영향을 고려한 태양전지 모듈의 $I-V$ 와 $P-V$ 특성곡선을 나타낸다. 그림자 영향은 태양전지 모듈의 면적에 대하여 30[%]의 경우와 50[%]의 경우를 고려하였다. 그림 14(a)은 태양전지 모듈의 $I-V$ 특성곡선, 그림 14(b)은 $P-V$ 특성곡선을 나타낸다. 그림자 영향이 있을 경우 태양전지의 최대전력을 위한 최적전압과 최적전류는 일사량 및 온도 변화에 비해 크게 변화되고 있으며, 그림자 영향이 30[%]일 경우 최적전압과 최적전류는 (27.2[V], 6[A]), 그림자 영향이 50[%]일 경우에는 (22.7[V], 5.5[A])로 나타난다.

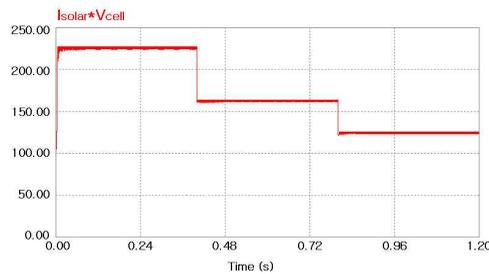
그림 15는 그림자 영향을 고려한 태양전지 모듈의 출력특성을 나타낸다. 그림 15(a)는 PO MPPT 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 출력 응답특성을 나타내며 최대전력 오차는 30[%]의 그림자 영향에서 15[W], 50[%]일 경우에는 18[W]로 그림자 영향이 높을수록 오차가 크게 나타난다. 그림 15(b)는 IC MPPT 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 출력 응답특성을 나타내며 PO 방법과 마찬가지로 IC 제어방법에서 그림자 영향이 클수록 오차가 높게 나타나며 정량적 수치는 14.5[W]와 18[W]를 나타낸다. 그림 15(c)는 본 논문에



(a) PO MPPT Method



(b) IC MPPT Method



(c) VPO MPPT Method

그림 15 태양전지모듈의 출력 응답특성(그림자 영향 고려)
Fig. 15 Response output characteristic of solar cell module(considering shadow influence)

서 제시한 VPO MPPT 제어방법에 대한 태양전지 모듈의 응답특성을 나타내며 그림자 영향에서도 제시한 제어방법의 최대전력 오차율은 1[%] 이내로 우수한 최대전력 추종 성능을 나타낸다. 종래의 PO와 IC MPPT 제어방법은 그림자가 발생할 경우 실제 최대전력점을 추적하지 못하고 국부적인 최대전력점에서 동작되기 때문에 오차가 많이 발생하며 본 논문에서 제시한 VPO MPPT 제어방법은 그림자가 발생하였을 경우에도 실제 최대전력점을 추적하게 되어 전력오차가 작게 발생한다.

5.2 실험결과 분석

본 논문에서 사용된 MIC 시스템의 실험장치의 사양은 표 2와 같다.

표 2 MIC 시스템의 실험장치 사양

Table 2 Experiment device specification of MIC system

구분	사양
태양전지 개방전압	42.8 [V _{dc}]
태양전지 단락전류	8.42 [A]
태양전지 최적전압	34.6 [V _{dc}]
태양전지 최적전류	6.5 [A]
입력 캐패시터	1200 [μF] /100 [V]
DC 링크단 캐패시터	220 [μF]/450 [V]
변압기 turns ratio	6 (1차측 4 : 2차측 24)
자화 인덕턴스	10 [μH]
누설인덕턴스	0.8 [μH]

그림 16~18은 태양광발전의 MPPT 제어에 대한 정상상태의 응답특성을 나타낸다. 여기서 CH1은 정상상태의 태양전지 전압값으로 25[V/div], CH2는 정상상태에서 자려 진동값으로 10[V/div]을 나타낸다. 그림 16은 PO MPPT 제어 방법에 대한 정상상태 응답을 나타내고, 그림 17은 IC MPPT 제어 방법에 대한 응답특성과 그림 18은 본 논문에서 제시한 VPO MPPT 알고리즘에 대한 정상상태 응답특성을 나타낸다. PO 제어방법에서의 자려 진동 값은 약 10[V], IC 제어방법에서는 약 4.8[V]이며 본 논문에서 제시한 VPO 제어방법에서는 약 1.8[V]를 나타낸다. VPO MPPT 제어 알고리즘은 종래의 PO와 IC MPPT 제어 알고리즘에 비해 정상상태에서 자려 진동의 폭이 매우 작게 나타나고 있으며 이는 제시한 알고리즘이 양호하게 수행되고 있음을 알 수 있다. 또한 작은 진동 폭으로 전력소모가 감소되어 MPPT 제어의 우수한 성능을 확인할 수 있다.

그림 19~21은 태양광발전의 MPPT 제어에 대한 그림자 영향에 대한 응답특성을 나타내며, 그림자 영향을 0[%]에서 30[%]로 변화하였다. 여기서 CH1은 출력전력의 지령값으로 50[V/div], CH2는 태양전지의 출력값으로 50[V/div]이며 시간은 200[ms/div]을 나타낸다. 그림 19는 그림자 영향에 대한 PO MPPT 제어방법의 응답을 나타내고, 그림 20은 IC MPPT 제어방법의 응답특성 및 그림 21은 그림자 영향에 대한 제시한 VPO MPPT 알고리즘의 응답특성을 나타낸다. 그림자 영향의 변화에 있어서도 제시한 MPPT 제어 알고리즘은 종래의 PO와 IC MPPT 제어 알고리즘에 비해 최대전력에 빠르게 도달하며 자려 진폭의 감소로 최대전력과의 오차가 가장 적게 나타나고 있다.

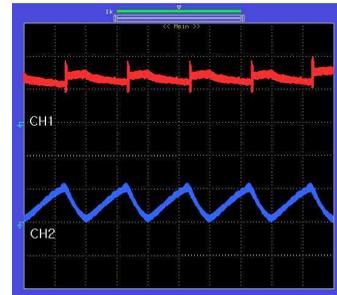


그림 16 PO MPPT 제어에 대한 정상상태 응답특성
Fig. 16 Steady state response characteristic with PO MPPT control

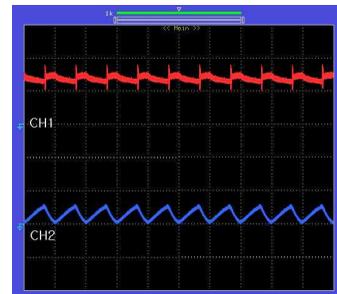


그림 17 IC MPPT 제어에 대한 정상상태 응답특성
Fig. 17 Steady state response characteristic with IC MPPT control

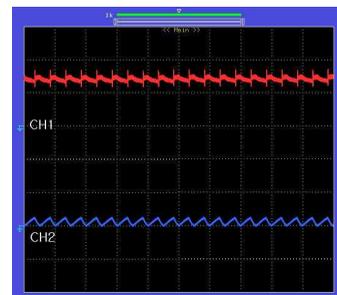


그림 18 VPO MPPT 제어에 대한 정상상태 응답특성
Fig. 18 Steady state response characteristic with VPO MPPT control

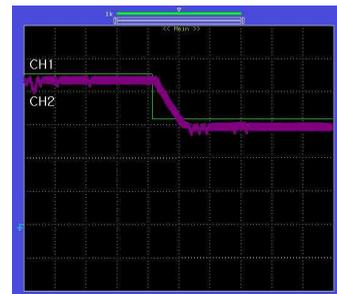


그림 19 그림자 영향에 대한 PO MPPT 제어의 응답특성
Fig. 19 Response characteristic of PO MPPT control with shaded effect

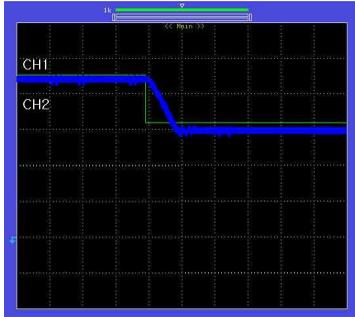


그림 20 그림자 영향에 대한 IC MPPT 제어의 응답특성
Fig. 20 Response characteristic of IC MPPT control with shaded effect

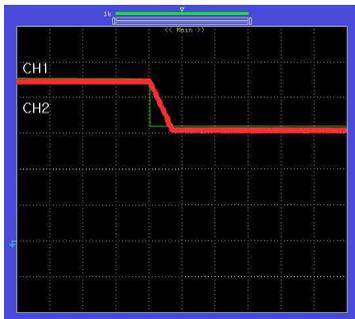


그림 21 그림자 영향에 대한 VPO MPPT 제어의 응답특성
Fig. 21 Response characteristic of VPO MPPT control with shaded effect

6. 결 론

본 논문에서는 그림자 영향을 고려한 PV시스템의 VPO MPPT 제어 알고리즘을 제시하였다. PV 시스템은 일사량 및 온도에 따라 그 출력특성이 크게 변화한다. 따라서 국부적인 그림자가 발생하였을 경우 이에 따른 영향에 매우 민감하다. 종래의 MPPT 제어방식들은 지속적인 자려진동을 통하여 최대전력점을 찾아가는 방식이며 대부분 출력이 급격하게 변동하는 태양전지에 그림자 효과가 발생한 경우에 대해서 고려하지 않았다. 이는 태양전지 셀을 직·병렬로 구성한 PV 모듈의 경우, 부분적인 그림자에 의해 다수의 국부적인 최대전력점이 존재하는 경우에는 최대전력점 추종을 실패할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 그림자 영향을 고려한 VPO MPPT 제어 알고리즘을 제시하였다. VPO MPPT 제어 알고리즘은 종래의 PO 제어 방법을 기반으로 하여 구조가 간단하며 구현이 용이하다. 또한 출력의 변동에 따라 스텝값이 가변하기 때문에 그림자 또는 온도 및 일사량 등의 환경요인이 변동할 경우 최

대전력점을 빠르게 추종할 수 있다. 이 특징으로 정상상태에 도달한 경우 최대전력점에서 자려 진동값이 매우 작아지게 되므로 시스템의 손실이 줄어든다.

본 논문에서는 종래의 PO와 IC MPPT 제어 방법을 제시한 새로운 MPPT 제어 방법과 응답특성을 비교하였다. 성능비교는 온도와 일사량이 변하는 조건과 그림자 영향에 대해 출력오차를 분석하였다. 제시한 MPPT 제어 알고리즘은 종래의 PO나 IC 제어 방법에 비해 온도와 일사량 및 그림자 영향에 대해 정상상태 출력 오차가 1[%] 이내로 매우 양호한 응답특성을 나타냈다. 이로써 본 논문에서 제시한 MPPT 제어 알고리즘의 타당성을 입증할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 김수덕, "신재생 전원설비의 전력수급계획 적용방안", *산업자원부 최종보고서*, pp. 13-20, 2005.
- [2] 전력거래소, "기반기금 적용대상 전원별 설비용량 및 기준가격", 전력거래소, 2006.
- [3] H. J. Noh, D. Y. LEE, D. S. Hyun, "An improved MPPT converter with current compensation method for small scaled PV-applications", *IEEE IES*, Vol. 2, pp. 1113-1118, 2002.
- [4] R. Andoubi, A. Mami, G. Dauphin, M. Annabi, "Bond graph modelling and dynamic study of a photovoltaic system using MPPT buck-boost converter", *IEEE ICS*, Vol. 3, pp. 200-205, 2002.
- [5] N. Femia, G. Petron, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 20, No. 4, pp. 963-973, 2005, Jul.
- [6] P. Wolfs, Q. Li "A current-sensor-free incremental conductance single cell MPPT for high performance vehicle solar arrays", *PESCO6*, pp. 1-7.
- [7] L. Zhanlg, A. Al-Amoudi, Y. Bai, "Real-time maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic systems", *IEEE Pabl.*, No. 475, pp. 124-129, 2000.
- [8] Tae-Kyung Kang, Kang-Hoon Koh, Young-Cheal Kim, "The study on MPPT algorithm for improved incCond algorithm", *한국태양에너지학회*, pp. 299-306, 2004.
- [9] E. Roman, P. Ibanez, S. Elorduizapatarietxe, R. Alonso, D.Goitia, and I. Martinez de Alegia, "Intelligent PV module for grid-connected PV systems", in *Proc. IEEE 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3082-3087, 2004, Nov.
- [10] X. Sun, W. Wu, X. Li, Q. Zhao, "A research on

photovoltaic energy controlling system with maximum power point tracking", *Proc. of PCC'02*, Vol. 2, pp. 822-826, 2002.

- [11] Geoff Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model", *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, Australia. pp. 49-55, 2001.
- [12] J. A. Abu-Qahouq, H. Mao, H. J. Al-Atrash, and I. Batarseh, "Maximum efficiency point tracking (MEPT) method and digital dead time control implementation", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 21, No. 5, pp. 1273-1281, 2006, Sep.

저 자 소 개



최정식(崔正植)

2005년 순천대 전기제어공학과 졸업 2007년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2011년 1월~현재 전자부품연구원 선임연구원.



고재섭(高在涉)

2005년 순천대 전기제어공학과 졸업 2007년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 3월 동 대학원 전기공학과 박사과정.



정동화(鄭東和)

1979년 영남대 전기공학과 졸업. 1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1988년~1989년 현대중전기(주) 기술연구소 책임연구원. 1989년~현재 순천대 전기제어공학과 교수.

기제어공학과 교수.